

равном 0,7...0,8 радиуса детали, относительная высота деталей из АМгбМ возросла до  $h/d = 0,21$ , а деталей из АМцАМ – до  $h/d = 0,30$ . Соответствующие расчётные значения  $h/d$  составляют 0,20 и 0,291.

**Выводы.** Полученные зависимости позволяют с достаточной степенью точности определять предельно допустимую высоту деталей типа днищ при изготовлении их статической и динамической гидроформовкой как без дополнительного силового воздействия на заготовку в процессе штамповки, так и при дополнительном силовом воздействии. При этом наиболее целесообразным является дополнительное нагружение периферийных частей заготовки с помощью переменного давления жидкости, применением накладок и др., позволяющее не только увеличить предельно допустимую высоту деталей, но и уменьшить их разнотолщинность.

**Список литературы:** 1. *Сторожев М. В., Попов Е.А.* Теория обработки металлов давлением. – М.: Машиностроение, 1977. – 424 с. 2. *Смирнов-Аляев Г.А.* Механические основы пластической обработки металлов. – Л.:Машиностроение,1968.- 272с. 3. *Исаченков Е.И.* Штамповка резиной и жидкостью – М: Машиностроение, 1997.–368с.; 4. *Фролов Е.А., Мовшович А.Я.,* Ударная и статикодинамическая штамповка сложнорельефных деталей упругими средами. Монография. 5. *Глазков В.И., Ершов В.И. Медведев Ю.Р.* Расчётное определение относительного удлинения поперечного сужения плоских образцов.– Заводская лаборатория. 1980,№2. с. 160-161.

*Надійшла до редколегії 30.10.2013*

УДК 621. 984

**Технологические возможности формообразования при гидроформовке подвижными средами // Кухарь В. В., Павленко В. Н., Носенко О. Г. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення у сучасних технологіях. – Харків, НТУ «ХПІ». – 2013. – № 42 (1015). – С. 115–119. Бібліогр.: 5 назв.**

У статті досліджені технологічні можливості операції листового штампування-гидроформовки рухомими середовищами: отримані залежності, які з достатнім ступенем точності дозволяють визначати висоту деталей типу днищ при виготовленні їх формовкою рідиною або еластичною середовищем. Практичне використання результатів роботи дозволить оптимізувати процес формозміни деталей такого типу.

**Ключові слова:** технологія, штампування, лист, рідина, еластичне середовище, формовка, можливості, деформування.

In this article explored the technological capabilities of sheet metal forming operations, hydroformed mobile environments: the dependences that with a sufficient degree of accuracy possible to determine the height of parts such as the bottoms of the manufacture of forming a liquid or elastic medium. The practical use of work will optimize the process of forming part of this type.

**Keywords:** technology, stamping, plate, liquid, elastic, forming, opportunities, deforming.

УДК. 621. 771. 01

**О. П. МАКСИМЕНКО**, докт. техн. наук, проф., ДГТУ, Днепродзержинск;  
**Д. И. ЛОБОЙКО**, аспирантка, ДГТУ, Днепродзержинск.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ НАТЯЖЕНИЙ НА ЭНЕРГОЗАТРАТЫ И УСТОЙЧИВОСТЬ ПРОЦЕССА ПРОКАТКИ

В статье проанализировано влияние различных значений удельных натяжений на устойчивость процесса прокатки и на энергозатраты на примере производства листа 3х1400 мм, по существующему

режиму обжатий, на стане горячей прокатки 1680 комбината «Запорожсталь». Устойчивость процесса определялась с учетом продольных сил пластически деформируемого металла. Показано, что с увеличением натяжения процесс становится энергетически более выгодным, но при этом снижается его устойчивость. Даны рекомендации по режиму натяжений для чистовой группы клетей стана 1680 при производстве листа 3х1400 мм.

**Ключевые слова:** продольная устойчивость процесса прокатки, коэффициент трения, момент прокатки, натяжение.

**Введение.** В работах [1-3] разработан новый теоретический метод оценки продольной устойчивости процесса прокатки. Его суть заключается в том, что контактные втягивающие силы затрачиваются не только на преодоление контактных выталкивающих, но и на уравнивание продольных сил, которые вызваны пластической деформацией металла. В результате чего предельные условия деформации наступают раньше, чем угол нейтрального сечения, а, следовательно, и опережение принимают нулевые значения, что экспериментально подтверждено в [4-6].

**Цель исследования.** Теоретический анализ влияния натяжений на устойчивость и общие энергозатраты в чистовой группе клетей стана горячей прокатки 1680 комбината «Запорожсталь».

**Материалы исследований.** Для проведения теоретических исследований воспользуемся данными о существующем режиме деформации на данном стане при прокатке листа 3х1400 мм из стали 3кп [7], приведенные в таблице 1. Основные параметры процесса прокатки ( $f_y$ ,  $t$ ,  $l_{cпл}$ ,  $\sigma_T$  и др.) рассчитывали по известным зависимостям [8, 9].

Таблица 1. Режим обжатий, силовые и кинематические параметры процесса прокатки листа 3х1400 мм в чистовой группе клетей стана 1680.

№ клетки	$h_1$ , мм	$\varepsilon$ , %	$\alpha_y$ , рад	$V_s$ , м/с	Опытная сила прокатки, $P_{оп}$ , МН	$P_{ср}$ , МПа	$f_y$	$t$ , °C	$l_{cпл}$ , мм
5	13,62	49,8	0,209	1,89	12,33	140	0,298	1012	63,88
6	8,33	38,8	0,131	3,08	10,75	142	0,234	1000	40,17
7	5,61	32,6	0,0944	4,6	12,57	302	0,185	996	30,5
8	4,28	23,3	0,066	6,03	10,67	344	0,171	970	22,1
9	3,37	21,3	0,055	7,66	9,53	369	0,173	925	18,8
10	3	11	0,035	8,6	4,55	271	0,18	900	12,3

Для удобства анализа все расчеты представлены в безразмерном виде.

Удельные натяжения по клетям относим к пределу текучести металла, т.е.:

$$q_{0i} = \frac{\sigma_{0i}}{\beta \sigma_{Ti-1}},$$

$$q_{li} = \frac{\sigma_{li}}{\beta \sigma_{Ti1}}.$$
(1)

Исследования проводили для минимальных, максимальных и средних безразмерных натяжений, которые выбирались из рекомендуемых значений [7].

Их величины приведены в таблице 2. Натяжения, создаваемые моталкой, во всех трех случаях оставались без изменения.

Для оценки устойчивости процесса прокатки по клетям стана использовали выше указанный метод оценки устойчивости процесса прокатки. Для этого теоретически рассчитывали распределения контактных напряжений  $\frac{p_x}{\beta\sigma_T}$  и  $\frac{t_x}{\beta\sigma_T}$ , используя дифференциальное уравнение Кармана. Рассчитывали горизонтальные напряжения  $\frac{q_x}{\sigma_T} = 2 \int_{\varphi}^{\alpha} \left( -\frac{p_x}{\beta\sigma_T} \sin \varphi + \frac{t_x}{\beta\sigma_T} \cos \varphi \right) d\varphi$  и текущую горизонтальную силу  $Q_x^* = \int_{\varphi}^{\alpha} \frac{q_x}{\beta\sigma_T} d\varphi$  в очаге деформации для всех случаев изменения натяжений по вышеприведенному режиму обжатий. В качестве модели трения принимаем кулоновскую зависимость, задачу Кармана решаем методом Рунге-Кутты.

Таблица 2. Значения безразмерных натяжений при прокатке листа 3х1400 мм в чистовой группе клетей стана 1680.

№ клетей	$q_0$		$q_1$		$q_{0cp}$	$q_{1cp}$
	min	max	min	max		
5	-	-	0,039	0,53	-	0,2845
6	0,039	0,53	0,034	0,363	0,2845	0,1985
7	0,034	0,363	0,03	0,256	0,1985	0,143
8	0,03	0,256	0,015	0,44	0,143	0,2275
9	0,015	0,44	0,015	0,246	0,2275	0,13
10	0,015	0,246	0,01	0,01	0,13	0,01
$\Sigma$	0,133	1,835	0,143	1,845	0,9835	0,9935

По эяграм изменения  $Q_x^*$  определяли результирующую продольных сил в безразмерной форме для каждого случая, используя следующую формулу:

$$Q_{cp}^* = \frac{1}{\alpha_y} \int_0^{\alpha_y} Q_x^* d\varphi. \quad (2)$$

В размерной форме эту величину можно рассчитать по формуле:

$$Q_{cp} = Q_{cp}^* \beta \sigma_T R b.$$

Также рассчитывали момент прокатки в каждой клетке, исходя из распределения напряжений трения, по формуле:

$$M_{np} = 2(T_{omc} - T_{on})R,$$

или в безразмерной форме:

где  $(T_{omc} - T_{on})$  – разница площадей напряжений трения в зонах отставания

$$M_{np} = 2(T_{omc} - T_{on}) \frac{R_{cпл}}{R_{ном}}, \quad (3)$$

и опережения, определяемые из эяур;

$R_{cпл}$  – сплюснутый радиус вала в каждой клетке;

$R_{ном}$  – номинальный радиус валка в каждой клетки, введен в формулу (3) для получения безразмерного момента.

В табл. 3 приведены результаты расчетов силы  $Q_{ср}^*$  и момента  $M_{пр}^*$  по клетям.

Таблица 3. Результаты расчета безразмерных величин сил  $Q_{ср}^*$  и моментов  $M_{пр}^*$  при прокатке листа 3х1400 мм в чистовой группе клетей стана 1680

№ клетки	Удельные натяжения					
	Минимальные		Средние		Максимальные	
	$Q_{ср}^*$	$M_{пр}^*$	$Q_{ср}^*$	$M_{пр}^*$	$Q_{ср}^*$	$M_{пр}^*$
5	0,01256	0,0589	0,01005	0,0454	0,00824	0,0305
6	0,00625	0,0237	0,0002	0,0234	0,00722	0,0225
7	0,00364	0,0123	0,00143	0,0125	-0,00113	0,0126
8	0,00253	0,0062	0,00128	0,0044	0,00048	0,0026
9	0,00234	0,0044	0,00103	0,0052	-0,00071	0,0059
10	0,00153	0,0017	0,00115	0,0028	0,00062	0,0039
$\Sigma$	0,02885	0,1072	0,01514	0,0937	0,01472	0,078

Как следует из таблицы, при минимальных натяжениях в очаге деформации во всех клетях чистовой группы стана средняя горизонтальная сила, определяемая по формуле (2), положительная, что свидетельствует об устойчивости процесса прокатки [1-3,10].

Для примера на рисунке 1 приведены эпюры изменения  $\frac{p_x}{\beta\sigma_T}$ ,  $\frac{t_x}{\beta\sigma_T}$ , и  $\frac{q_x}{\beta\sigma_T}$ , для 7 клетки стана с минимальными безразмерными натяжениями ( $q_0 = 0,034$ ,  $q_1 = 0,03$ )/

При прокатке со средними удельными натяжениями сила  $Q_{ср}^*$  также положительна, но является меньшей по величине, следовательно, процесс является менее устойчивым.

В случае же максимального значения натяжений – в 7 и 9 клетях сила  $Q_{ср}^*$  уже отрицательна в результате значительного заднего натяжения, т.е. устойчивая прокатка в данных клетях невозможна.

Проанализируем изменения суммарного момента деформации в зависимости от натяжения полосы. На рисунке 2 приведена зависимость суммарной средней результирующей горизонтальной силы и суммарного момента деформации от абсолютного значения суммарного натяжения полосы.

Как видно, с увеличением этого натяжения суммарный момент прокатки снижается. Из этого можно сделать вывод, что энергетически выгодно вести процесс с большими натяжениями, однако, при этом ухудшается устойчивость процесса прокатки, поскольку уменьшается  $Q_{ср}^*$ .

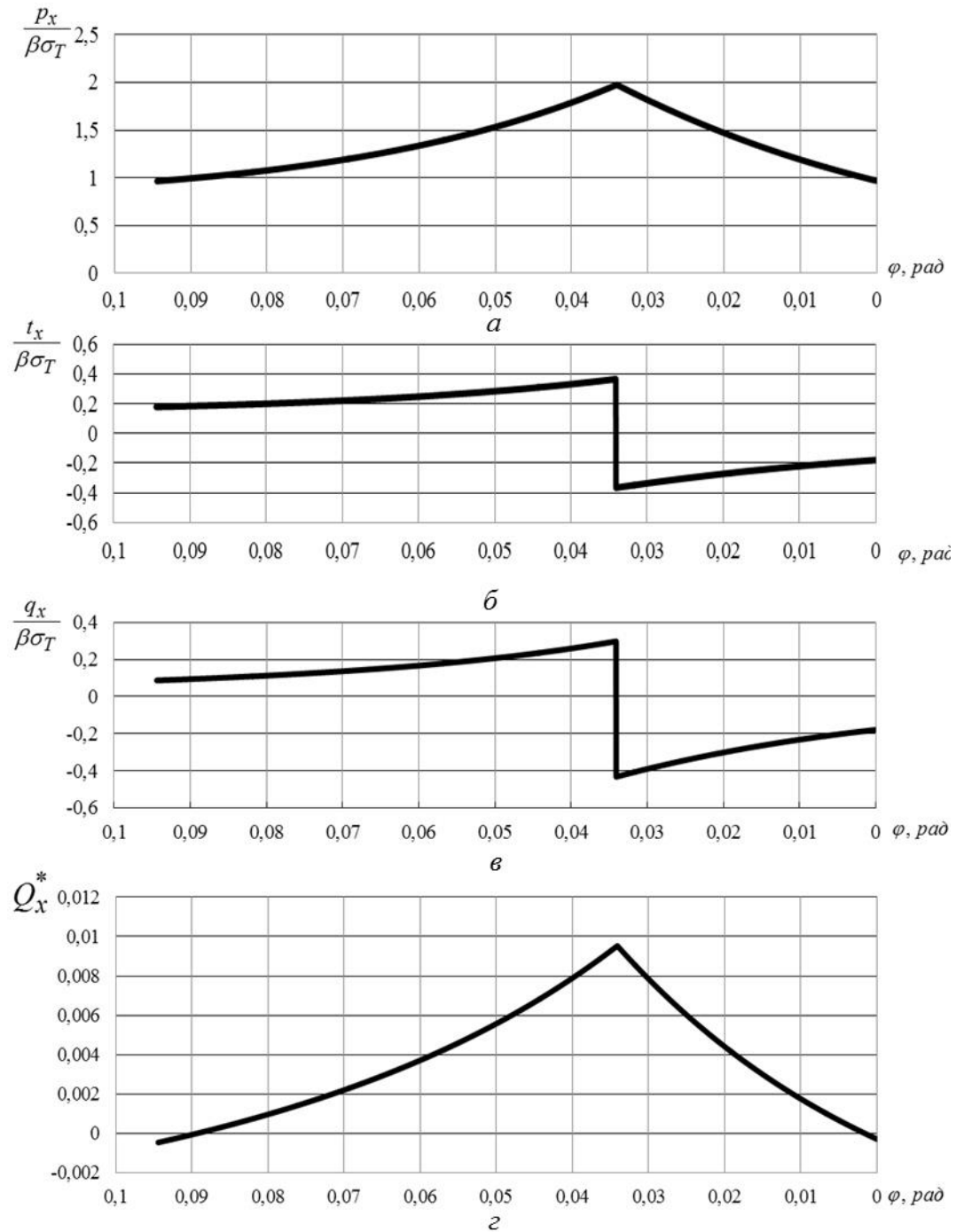


Рис. 1. – Теоретические эпюры распределения:  $a$ ,  $b$  – контактных напряжений,  $\epsilon$  – горизонтальных напряжений;  $z$  – текущих контактных сил по длине очага деформации при прокатке листа 3x1400 мм в 7 клетки стана 1680

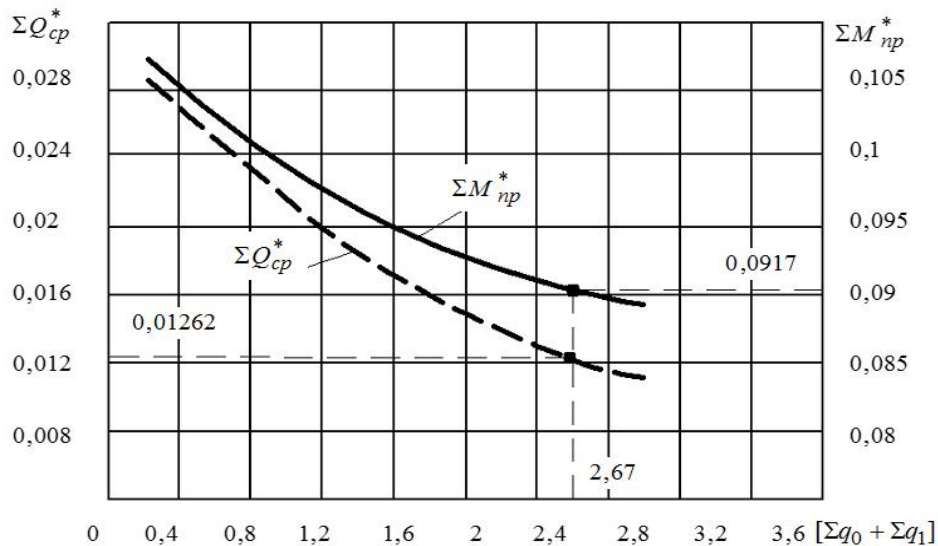


Рис. 2. – Зависимость суммарной результирующей горизонтальной силы и суммарного момента деформации от абсолютного значения суммарного удельного натяжения полосы

**Результаты исследования.** Таким образом, отметим, что увеличение межклетевых натяжений на стане должно быть строго согласовано с продольной устойчивостью процесса прокатки. С этой целью разработаны оптимальные значения удельных натяжений по клетям при прокатке листа 3x1400 мм на стане 1680 комбината «Запорожсталь». Эти натяжения обеспечивают минимальный затрачиваемый суммарный момент деформации при устойчивом процессе. Данные натяжения были выбраны по причине того, что при дальнейшем увеличении их значений в некоторых клетях чистовой группы стана средняя горизонтальная сила становится отрицательной. Предложенный режим натяжений приведен в табл. 4. На графике (рис. 2) этот случай показан квадратными маркерами.

Таблица 4. Предлагаемые режимы натяжений для прокатки листа 3x1400 мм на стане 1680 комбината «Запорожсталь»

№ клетки	Предлагаемое безразмерное натяжение		$Q_{cp}^*$	$M_{np}^*$
	$q_0$	$q_1$		
5	-	0,28	0,01009	0,0457
6	0,28	0,25	0,00018	0,0217
7	0,25	0,25	0,00063	0,0111
8	0,25	0,3	0,00054	0,0047
9	0,3	0,25	0,00049	0,0045
10	0,25	0,01	0,00069	0,004
$\Sigma$	1,33	1,34	0,01262	0,0917

**Выводы.** Проанализирована устойчивость процесса прокатки и изменение суммарного момента деформации в чистовых клетях стана 1680 горячей прокатки комбината «Запорожсталь» при разных натяжениях. Исследования проводились с использованием нового метода оценки устойчивости процесса прокатки, который отличается, от более раннего, учётом внутреннего напряжённого состояния металла. Показано, что увеличение

удельных натяжений снижает энергозатраты на ведение процесса, но при этом ухудшается устойчивость деформации. Разработаны оптимальные режимы натяжений при прокатке листа 3x1400 мм, которые рекомендуются для производства на стане 1680 комбината «Запорожсталь».

**Список литературы:** 1. Максименко О. П. Исследование средней результирующей горизонтальных сил в очаге деформации при прокатке. / О. П. Максименко, Р.Я. Романюк // Изв.вуз. Черная металлургия. – 2009. – №10. – С.22-24. 2. Максименко О. П. Анализ равновесия сил в очаге деформации при простом процессе прокатки / О. П. Максименко, Р.Я. Романюк // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія машинобудування. – К.: НТУУ «КПІ». – 2010. – №59. – С.161-164. 3. Максименко О. П. Оценка устойчивости процесса прокатки жести на стане 1400 КарМК / О. П. Максименко, Р.Я. Романюк // Обработка материалов давлением: сб. науч. трудов. – Краматорск: ДГМА. – 2010. – №4(25). – С.173-178. 4. Грудев А. П. Захватывающая способность прокатных валков / А. П. Грудев. – М.: «СП Интермет Инжиниринг», 1998. – 283 с. 5. Грудев А. П. Внешнее трение при прокатке / А. П. Грудев. – М.: Металлургия, 1973. – 288 с. 6. Прокофьев В.И. Максимальные углы захвата при установившемся процессе прокатки / В.И. Прокофьев // Обработка металлов давлением: Научные труды, ДМетИ. – М.: Металлургиздат. – 1962. – Вып. XLVIII. – С.324-329. 7. Сафьян М. М. Прокатка широкополосной стали / М. М. Сафьян. – М.: Металлургия, 1969. – 460 с. 8. Грудев А. П. Теория прокатки: [учебник для вузов] / А. П. Грудев. – М.: Металлургия, 1988. – 240 с. 9. Василев Я. Д. Теорія поздовжньої прокатки / Я. Д. Василев, О. А. Мінаєв. – Донецьк: УНІТЕХ, 2009. – 488 с. 10. Максименко О. П. Разработка рациональных режимов натяжений на жестикатальных станах комбината «Запорожсталь» / О. П. Максименко, Р.Я. Романюк // Обработка материалов давлением: сб. науч. трудов. – Краматорск: ДГМА. – 2012. – №1(30). – С.178-181.

Надійшла до редакції 28.10.2013

УДК. 621. 771. 01

**Теоретический анализ влияния натяжений на энергозатраты и устойчивость процесса прокатки** // Максименко О. П., Лобойко Д. И. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях – Харків: НТУ «ХПІ». – 2013. – № 42 (1015). – С. 119–125. Бібліогр.: 10 назв.

У статті проаналізований вплив різних значень питомих натягів на стійкість процесу прокатки і на енерговитрати на прикладі виробництва листа 3x1400 мм, по існуючому режиму обтиснень, на стані гарячої прокатки 1680 комбінату «Запорожсталь». Стійкість процесу визначалась з врахуванням поздовжніх сил металу, що пластично деформується. Показано, що зі збільшенням натягу процес стає енергетично більш вигідним, проте при цьому знижується його стійкість. Дані рекомендації що до режиму натягів для чистової групи клітей стана 1680 при виробництві листа 3x1400 мм.

**Ключові слова:** поздовжня стійкість процесу прокатки, коефіцієнт тертя, момент прокатки, натяг.

In the article analyzes the effect of different values for specific tension on the stability of the rolling process and the energy consumption for example, the production of sheet 3x1400 mm, under the existing regime compresses, hot rolling mill plant in 1680 «Zaporizhstal». The stability of the process was determined taking into account the longitudinal forces plastically deformable metal. It is shown that an increase in process tension is energetically more favorable, but decreases its stability. The recommendations on the treatment of tension for the finishing mill stands in 1680 in the production of sheet 3x1400 mm.

**Keywords:** longitudinal stability of the process of rolling, coefficient of friction, rolling moment, the tension strip.